第 37 卷第 11 期 2017 年 6 月 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.37,No.11 Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201702200273

彭建,武文欢,刘焱序, 胡熠娜.基于 PSR 框架的内蒙古自治区土壤保持服务分区.生态学报,2017,37(11):3849-3861.

Peng J, Wu W H, Liu Y X, Hu Y N.Soil conservation service zoning in the Inner Mongolia Autonomous Region based on PSR framework.Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3849-3861.

基于 PSR 框架的内蒙古自治区土壤保持服务分区

彭 建[1,2],武文欢[1],刘焱序[2], 胡熠娜[2]

1 北京大学城市与环境学院,地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871

2 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院,城市人居环境科学与技术重点实验室,深圳 518055

摘要:土壤侵蚀是中国北方重要的生态问题,内蒙古自治区位于干旱半干旱地区,是中国北方典型的土壤侵蚀区。针对以往生态功能分区分析框架复杂多样、权重设定人为主观等问题,以内蒙古自治区为例,基于压力-状态-响应系统分析框架,从气候背景-土壤保持-植被条件三方面构建指标体系,运用自组织特征映射(SOFM)神经网络和 GIS 空间分析技术,以 1280 个小流域为基本单元进行土壤保持服务分区,按照分区单元的聚集度对多种方案进行优选,并依据区域共轭性原则最终将研究区划分为 3 个土壤保持服务区和 11 个土壤保持服务亚区。

关键词:土壤保持服务;RUSLE 模型;RWEQ 模型;SOFM 神经网络;内蒙古自治区

Soil conservation service zoning in the Inner Mongolia Autonomous Region based on PSR framework

PENG Jian[1,2], WU Wenhuan[1,2], LIU Yanxu[2], HU Yina[2]

1 *Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*

2 *Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen* 518055, *China*

Abstract: Soil erosion has been a critical ecological issue in northern China. Inner Mongolia Autonomous Region is located in the arid and semi-arid area, which is a typical soil erosion area in northern China. Based on the analytical framework of pressure-state-response (PSR), this study takes the Inner Mongolia Autonomous Region as the study area, and constructs the index system from three aspects: climatic background, soil conservation, and vegetation condition. It aims at addressing the remaining issue of complexity and subjectiveness in weigh specification towards ecological function zoning in the previous studies. In the study, self-organizing feature map (SOFM) neural network and GIS spatial analysis technique were applied to carry out the soil conservation service zoning with the 1280 small watersheds as the basic unit and the schemes were optimized according to the aggregation degree of the zoning units. The Inner Mongolia Autonomous Region was divided into three ecological functional zones and eleven sub-zones based on the principle of regional conjugation. The three ecological functional zones include Soil Conservation Services Protection Area, Soil Conservation Services Controlling Area, and Soil Conservation Services Rehabilitation Area. According to the characteristics of zoning, the results clearly indicate the zonal distribution of climatic background, soil conservation service and vegetation condition in Inner Mongolia, and quantify the characteristics and spatial differences of the ecological functions at watershed scale more comprehensively. The result of the optimal soil conservation service zoning was compared to the annual average temperature contours and annual precipitation contours in Inner Mongolia. It shows that the ecological function zoning results obtained by SOFM neural network model were

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项经费课题(201511001-01)

收稿日期:2017-02-22; **修订日期**:2017-05-23

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: jianpeng@ urban.pku.edu.cn

in good agreement with the spatial patterns of basic ecological elements. The zoning scheme indicates a significant gradient and is consistent with changes in temperature and precipitation.

Key Words: soil conservation service; RUSLE model; RWEQ model; SOFM neural network; Inner Mongolia Autonomous Region

土壤是一种有限的自然资源,由于土壤侵蚀导致的土地退化,威胁全球经济发展、粮食安全和人类福祉[1]。风蚀和水蚀是导致土地退化面积最大、影响范围最广的主要土壤侵蚀类型,其中水蚀占全球土壤侵蚀面积约56%、风蚀约占28%[2]。中国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一[3],因水蚀和风蚀造成的土壤退化占全国总土地退化面积的83.56%[4]。另一方面,自然资源开发利用的同时,需要确保生态基础、生态环境得到最大限度保护[5]。因此,开展以土壤保持服务为重点的生态功能分区能够明确区域生态系统特征,辨析主要生态环境问题及其空间分异,从而有助于实现区域可持续发展的分区管治。

空间区划一直以来都是地理学的传统研究主题。生态功能分区研究最早于1976年在美国兴起[6],重点关注国家等大尺度研究[7-9]。自21世纪以来,随着人地矛盾不断加剧,我国以政府为主导的生态功能分区工作自"十一五"开始[10],先后开展了多项以国家和省域尺度为重点的生态功能分区[11-14]。此后,越来越多的学者将研究尺度推广到市[15-20]、县[21],以至于流域[10,22-24]。总体而言,现有生态功能区划研究在分区视角上基本相似,多数注重对单一分区方案的宏观描述,而多种分区方案的对比和定量化方案筛选逐步成为研究热点方向。在分区方法和技术层面,已有研究多采用专家集成方法[25],存在主观性强、个体差异大等缺点。虽然回归分析、主成分分析和聚类分析等数理方法能够对线性可分问题给出详细解释,但针对线性不可分问题难以给出合理解决方案[26]。随着地理学计量革命的兴起,计算机技术在自然地理区划研究中的应用越来越广泛,新方法逐渐兴起,如人工神经网络、模糊集合理论、模拟退火算法和遗传算法等[27]。其中,凭借非线性优势的自组织特征映射(self-organizing feature maps, SOFM)神经网络模型在地理学分区工作中受到越来越多的学者青睐[28-35]。而重点关注土壤保持服务相关的分区研究,目前大多注重结果的宏观表达,在全国尺度上较为完善[36-38],分别完成全国土壤侵蚀区划[39]及土壤侵蚀调查[40]。此外,大多数研究侧重水蚀性或风蚀等单一类型土壤侵蚀评估[41-43],缺乏小尺度的综合性土壤保持服务研究。

内蒙古自治区处于干旱半干旱地区,生态环境敏感脆弱,植被覆盖率低,存在大范围的生态破坏和严重的水土流失现象[44]。该地区经济结构单一,长期以来以资源消耗为主的经济增长方式,使得对水土资源的过度利用,造成了严重的土地退化。同时,我国三分之一面积的沙漠和沙地分布于此[45],大面积的沙源和高频发的大风使内蒙古土壤侵蚀过程加剧。土壤侵蚀导致的土地沙漠化和土地退化导致土壤的生产力降低[46-49],而扬沙大风和沙尘暴等恶劣的天气更是对空气质量造成严重影响。针对内蒙古自治区特殊的生态环境问题,开展土壤保持服务分区能够为土壤保持功能的修复及土壤侵蚀防护提供决策指引。因此,本研究以内蒙古自治区为例,基于压力-状态-响应系统分析框架,从气候背景-土壤保持-植被条件三方面构建指标体系,运用SOFM神经网络和GIS空间分析技术,以1280个小流域为基本单元进行土壤保持服务分区,按照分区单元的聚集度对多种方案进行优选,并依据区域共轭性原则开展内蒙古自治区土壤保持服务区划。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区地处中国北部边疆,是我国重要的生态屏障与农牧业生产基地。全区位于中纬度内陆,总面积约118.3万km^2;以温带大陆季风性气候为主,从东到西跨越了温带湿润区、半湿润区、半干旱区、干旱区和极端干旱区等5个气候类型区,从而形成了多样的地理环境和丰富的自然资源;年降水量约为30—500mm,由东北向西南递减,植被类型上由东到西分别为森林、草原、荒漠草原、沙漠等[50-51]。内蒙古地貌以内蒙古高

原为主(图 1),大部分地区海拔在 1000m 以上[52],生态系统呈现"东林中草西沙、北牧南农"基本格局,草地是内蒙古最主要的生态系统类型。近年来,由于内蒙古地区经济快速增长,资源开发力度增大,过度放牧和草原大范围垦殖,造成了大面积的草地退化和荒漠化,加之该地区分布大面积的沙漠、大风天气频发以及常年干旱少雨使该区域土壤侵蚀现象加剧[53]。针对土壤侵蚀和生态退化问题,内蒙古自治区实行了退耕还林还草、天然林保护、京津风沙源治理、生态移民、封育轮牧等一系列生态保护和建设工程,以缓解生态压力[54]。

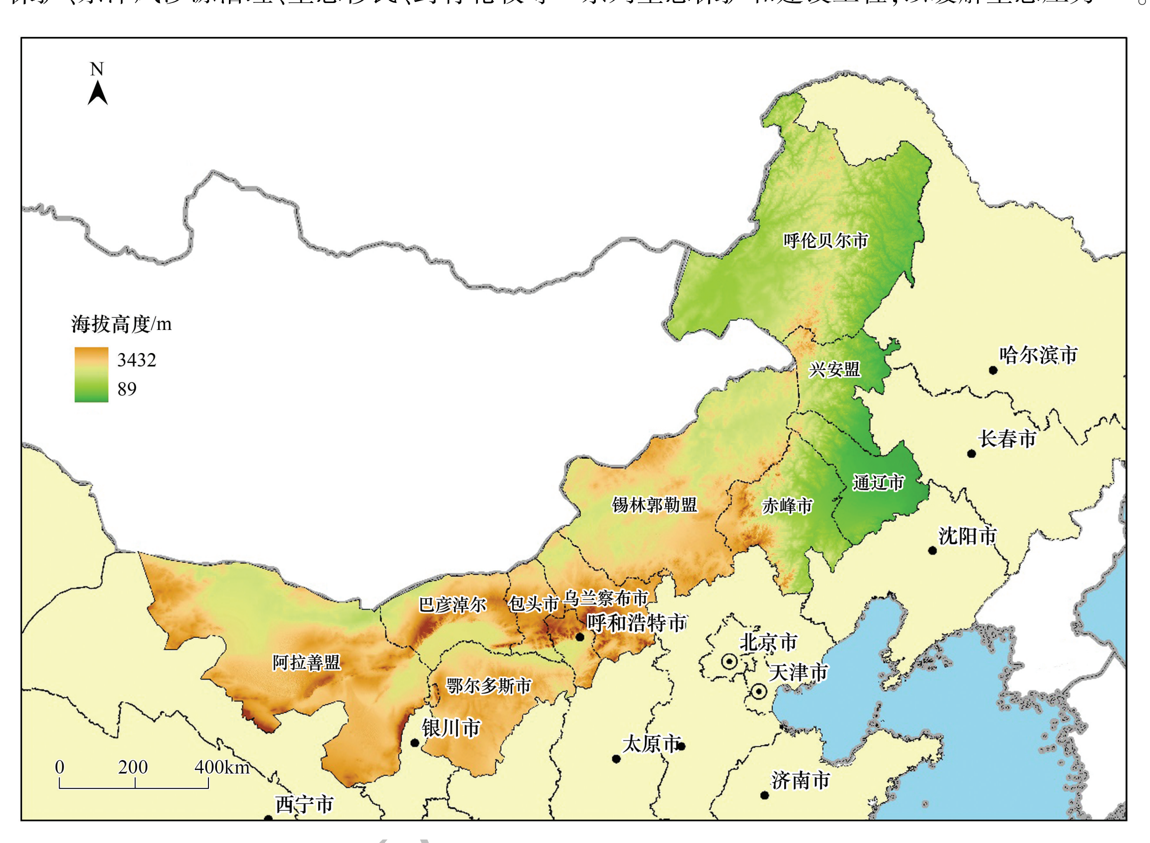


图 1　内蒙古自治区地理位置示意

Fig.1　Location of Inner Mongolia Autonomous Region

1.2　土壤保持服务分区指标体系

土壤保持服务分区是侧重于单一类型生态系统服务的生态功能分区,而生态功能分区的本质是根据区域资源环境要素、生态系统类型、生态系统受胁迫过程与效应、生态敏感性与生态系统服务空间分异的规律进行的地理空间分区,从而将特定区域划分成不同的生态功能区。因此,基于景观生态学生态空间理论,可以将气候背景、土壤保持和植被条件分别表征生态系统受到的压力、土壤保持服务状况及其适应能力,对应"压力-状态-响应"(Pressure-State-Response, PSR)模型,构建土壤保持服务分区概念框架。以压力、状态和响应 3 类指标表征,能全面系统地反映自然生态系统受到外界作用的因果关系。其中,压力指外界对自然生态系统的干扰,状态指特定时间阶段的生态环境状态或生态环境健康水平,响应代表生态系统对外界干扰做出的反应。具体而言,本研究选择对内蒙古自治区土壤保持服务影响显著的气候因素——降水和风速作为压力指标,以风蚀性土壤保持量和水蚀性土壤保持量,共同表征土壤保持服务状态。用直接反映生态系统新陈代谢和活力的净初级生产力(net primary productivity, NPP)表征生态系统的响应,则是因为 NPP 和 NDVI 具有显著线性关系,能反映该地区植被条件和生态恢复的波动情况;而以 NPP 变化率和均值作为响应指标,是对未来生态系统服务变化延展性的良好表达,具有稳健性。因此,综合考虑指标的实效性和合理性,选择三大类 6 个指标作为内蒙古自治区土壤保持服务分区的定量依据(表 1)。需要说明的是,本文采用 PSR 框架仅仅是作为指标体系选择的指导,由于 SOFM 模型可以规避主观因素的影响,所以不存在权重设置的问题。

1.2.1 压力指标

风速状况和降水条件可以反映区域风力和水分的作用状况,其变率可以反映稳定性,定量表征生态系统受到的压力,计算公式如下:

$$Slope = \frac{n\sum_{i=1}^{n} i\,a_i - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} a_i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2 - (\sum_{i=1}^{n} i)^2} \quad (1)$$

式中, $Slope$ 表示降水或风速的变化率, a_i 表示每年的降水或风速, n 表示年份;当 $Slope > 0$ 时,降水或风速有增大的趋势;当 $Slope < 0$ 时,降水或风速有减小的趋势;且数值越趋于 0,表示变化越小、土壤侵蚀压力越小。降水和风速数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn)提供的 695 个气象站点 2005—2015 年的观测数据,为提高准确性,剔除空值,并通过 ArcMap 10.2 中的 Kriging 插值工具得到。

表 1 内蒙古自治区土壤保持服务分区指标体系

Table 1 Index system for soil conservation service zonation in Inner Mongolia Autonomous Region

基准层 Reference layer	准则层 Criteria layer	评价指标 Evaluation index
压力指标	气候条件	风速变化率
Pressure indicator		降水变化率
状态指标	土壤保持服务	风蚀性土壤保持量
State indicators		水蚀性土壤保持量
响应指标	植被条件	NPP 变化率
Response indicators		多年平均 NPP

1.2.2 状态指标

(1)风蚀性土壤保持量

充分考虑气象条件、土壤结皮、土壤可蚀性、植被状况、地表粗糙度等要素,通常采用修正风蚀方程 RWEQ 计算风蚀性土壤保持量[55],已有研究表明,该模型具有因子全面、构成简单等优点,并能在区域尺度对土壤风蚀进行准确估算[56-57]。实际土壤侵蚀量的计算公式如下:

$$S_{SL} = \frac{2z}{S^2} Q_{max}\, e^{-(\frac{z}{s})^2} \quad (2)$$

$$S = 150.71\,(WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K' \cdot C)^{-0.3711} \quad (3)$$

$$Q_{\max} = 109.8(WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K' \cdot C) \quad (4)$$

式中, S_{SL} 表示实际土壤侵蚀量(kg/m^2); Q_{max} 是最大转运容量(kg/m); S 是关键地块长度(m); z 是所计算的下风向距离(m); WF 是气象因子; EF 为土壤可蚀性因子; SCF 为土壤结皮因子; K' 是土壤粗糙度因子; C 为植被覆盖因子。

潜在土壤侵蚀量的计算公式如下:

$$S_{PL} = \frac{2z}{{S_P}^2} Q_{maxP}\, e^{-(\frac{z}{s})^2} \quad (5)$$

$$S_P = 150.71\,(WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K')^{-0.3711} \quad (6)$$

$$Q_{maxP} = 109.8(WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K') \quad (7)$$

式中, S_{PL} 表示潜在土壤侵蚀量(kg/m^2); Q_{maxP} 是潜在最大转运容量(kg/m); S_P 是潜在关键地块长度(m)。

实际土壤保持量则由潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量作差得到:

$$S_L = S_{PL} - S_{SL} \quad (8)$$

式中, S_L 表示实际土壤保持量(kg/m^2)。其中,风速、降水、太阳辐射数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn)提供的 695 个气象站点 2015 年的观测数据;温度数据来自于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)提供的 2015 年中国 1km 地表温度的月合成产品;雪盖因子来源于中国西部环境与生态科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn)提供的中国雪深长时间序列数据集,空间分辨率为 1km;土壤数据来自第二次全国土地调查 1:100 万土壤数据;NDVI 数据来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)提供的 2015 年中国 500m NDVI 月合成产品;全国范围 1km 分辨率的 DEM 数据来源于“黑河计划数据管理中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)。

(2)水蚀性土壤保持量

采用广泛应用的 RUSLE 模型来估算潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量,二者之差即为实际的土壤保持量[58]。其中,实际土壤侵蚀量的计算公式如下:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{9}$$

式中, A 为实际土壤侵蚀量($\text{t hm}^{-2}\ \text{a}^{-1}$), R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可蚀性因子, LS 统称为地形因子(其中 L 为坡长因子、S 为坡度因子), C 为植被覆盖管理因子, P 为水土保持措施因子。

在 RUSLE 模型中不考虑植被覆盖管理因子 C 与水土保持措施因子 P ,即将两项因子的数值设为 1,则公式变为:

$$A_P = R \cdot K \cdot LS \tag{10}$$

式中, A_P 为潜在土壤侵蚀量($\text{t hm}^{-2}\ \text{a}^{-1}$),表示在没有任何植被覆盖管理与水土保持措施下的土壤侵蚀量。基于"地表覆被替换假设",土壤保持量即可表示为潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差。

1.2.3　响应指标

生态系统受到大风和降水的直接影响,而植被净初级生产力能够指示生态恢复的波动状况[13],所以选择 NPP 的变化率和多年均值表示生态系统受到压力后所做出的响应。其中,NPP 变化率的计算公式如下:

$$Slope = \frac{n\sum_{i=1}^{n} i\,NPP_i - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} NPP_i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{11}$$

式中, $Slope$ 是 NPP 变化率,表示植被变化幅度, n 是年数。NPP 数据来源于美国 NTSG 组织(http://www.ntsg.umt.edu/)提供的 2005—2015 年 1km MODIS17A03 数据。

1.3　生态功能分区方法

目前,传统的生态分区研究大都选择自上而下、从高到低的分区方法[13],具有过程复杂、耗时、主观性强的缺点。本研究选取 SOFM 神经网络模型进行自下而上的分区,能有效规避权重设置的主观性问题,使得分区结果更加精准可靠。SOFM 神经网络又称自组织特征映射网络,由芬兰学者 Kohonen 于 1982 年提出[59],是一种非监督型的人工神经网络模型。该模型的工作原理为在接受输入样本之后进行竞争学习,功能相同的输入距离比较近,不同的距离比较远,以此将一些无规则的输入自动排开,即根据各输入数据的相似性,将其归为一类。尤其适用于数据结构复杂、数据量大和非线性特征明显的生态地理问题的求解过程[29]。

多分区方案的优选在区域共轭性原则下进行,要求分区结果具有一定的空间连续性[60]。同时,在多种空间聚类方案中选择最优分区方案,可以分区单元的聚集程度作为选择依据[32]。由于聚集度指数(aggregation index, AI)可以定量描述景观中各类型区域的团聚程度[61],因此,在本研究中选择景观水平的聚集度指数判定最优分区方案:

$$AI = \left| \sum_{i}^{m} \left(\frac{g_{ii}}{maxg_{ii}} \right) P_i \right| \cdot (100)\ ,0 \ll AI \ll 100 \tag{12}$$

式中, g_{ii} 为斑块类型 i 像元之间的节点数; $maxg_{ii}$ 为斑块类型 i 像元之间的最大节点数; P_i 为斑块类型 i 所占的面积比例。其中, AI 随着斑块类型的聚集水平增大而增大。由于不同分区数目的景观聚集度指数不同,当聚集度指数较小时,其结果能够表现区域内部生态问题的差异性,因此,将景观聚集度指数较小的聚类结果作为划分亚区的依据[35]。而当聚集度指数最大时,分区方案中各类型区域聚集程度最高,因此,选取景观聚集度指数最大时的分区结果作为一级分区的最优方案。基于此,按照区域共轭性原则,在保留二级分区完整性的基础上进行类型归并得到内蒙古自治区土壤保持服务一级分区方案。

2　结果与分析

2.1　土壤保持量空间格局

利用 RWEQ 模型对内蒙古自治区风蚀性土壤保持服务进行评价,实际的土壤侵蚀情况如图 2 所示,研究

区风蚀区域集中分布在中西部地区,这也是内蒙古自然地理和气候分布的特点所致。2015 年内蒙古全区风蚀总面积为 55.1128 万 km^2,约占土地总面积的 46.6%,风蚀总量为 27.33 亿 t。在空间分异上,风蚀较为严重的地区主要包括巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地、浑善达克沙地和阴山山脉。这些地区植被较差,风场强度较高,降水量较低,雪被覆盖地表时间较短;而风蚀力是造成土壤侵蚀的主要因素,植被覆盖则对风蚀的削弱作用较为明显[41]。利用潜在土壤侵蚀和实际土壤侵蚀的差值得到内蒙古自治区风蚀性土壤保持能力,整体空间格局为东高西低、南多北少,2015 年内蒙古风蚀性土壤保持总量为 27.21 亿 t,土壤保持量较高的地区主要分布在科尔沁沙地、浑善达克沙地以及鄂尔多斯高原。

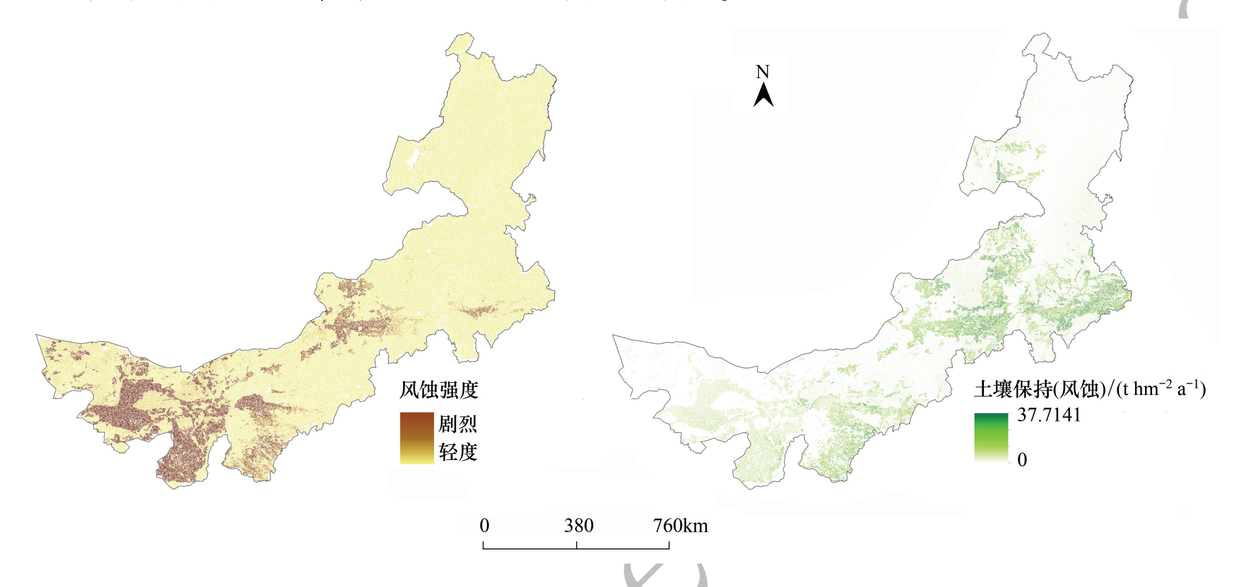


图 2 内蒙古自治区风蚀性土壤保持服务空间分布

Fig.2 Spatial distribution of wind erosion and soil conservation service in Inner Mongolia Autonomous Region

利用 RUSLE 模型对内蒙古自治区水蚀性土壤保持服务进行评价,实际的土壤侵蚀情况如图 3 所示,呈现出在内蒙古中东部区域由东北向西南的条带状分布格局。内蒙古自治区的地貌以高原为主体,平均海拔 1000m 左右,占总土地面积的 50%左右,地势较高但地形相对平坦。高原四周分布着大兴安岭、阴山(狼山、色尔腾山、大青山、灰腾梁)、贺兰山等山脉,构成内蒙古高原地貌的脊梁。在大兴安岭的东麓、阴山脚下和黄河岸边,有嫩江西岸平原、西辽河平原、土默川平原、河套平原及黄河南岸平原。而在山地向高平原、平原的交接地带,分布着黄土丘陵和石质丘陵,其间杂有低山、谷地和盆地分布,水土流失较严重。利用潜在土壤侵蚀和实际土壤侵蚀的差值得到内蒙古自治区的水蚀性土壤保持能力,由于内蒙古水土流失现象较少,其水蚀性土壤保持能力空间格局与水蚀性土壤侵蚀空间格局基本一致,土壤保持量较高的地区主要沿大兴安岭山脉以及乌兰察布地区分布。2015 年内蒙古自治区水蚀性土壤保持物质量为 21.41 亿 t,水土流失总面积为 17.3 万 km^2,约占土地总面积的 15%。

2.2 土壤保持服务压力、响应空间格局

内蒙古自治区多年风速变化趋势呈现西北部低、东南部和东北部高的空间分布格局(图 4)。呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市的大部分地区呈现风速增大的态势,鄂尔多斯市和呼和浩特市也呈现风速增大的趋势,而阴山山脉以北和内蒙古高原地区的风速则明显减小。大兴安岭和阴山山脉是内蒙古自治区气候差异的重要分界线,对于当地的风速变化率影响很大。该分界线贯穿内蒙古自治区,由东北向西南依次穿过大兴安岭林区、阴山、浑善达克沙地和巴丹吉林沙漠。该分界线的西北侧为风速变化率的低值区,呈现风速减小的趋势,也属于内蒙古自治区的干旱区;而分界线的东南侧为风速变化率的高值区,呈现出风速增大的趋势,也是内蒙古自治区降水相对丰沛的区域。

内蒙古自治区多年降水变化趋势呈现中部地区低、东北和西北地区高的空间分布格局(图 4),这表明内

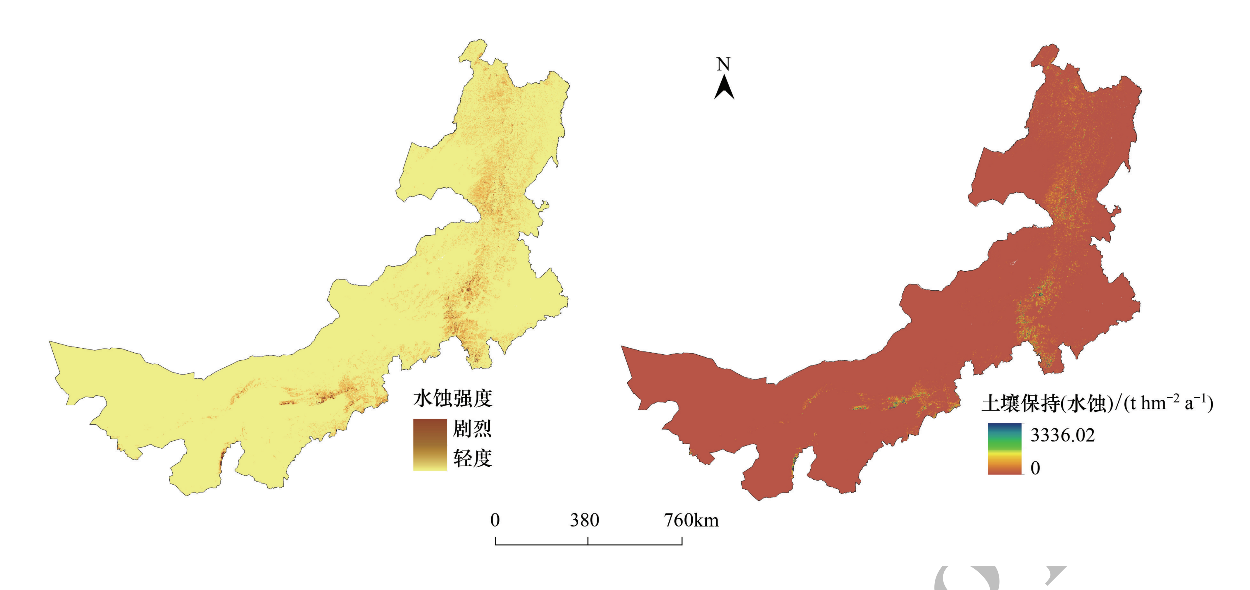


图 3　内蒙古自治区水蚀性土壤保持服务空间分布

Fig.3　Spatial distribution of water erosion and soil conservation service in Inner Mongolia Autonomous Region

蒙古自治区降水变化的空间分布在一定程度上受大尺度海陆格局的影响。中部大部分地区降水较为稳定,有降水逐渐减小的趋势,呼伦贝尔地区呈现降水丰沛且逐渐增大的趋势,而巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠虽然降水量极少,但变化幅度较大,有降水量增大的趋势。这种降水变化率的空间分布同湿润区向干旱半干旱区过渡的空间分布较为符合。从内蒙古自治区的植被覆盖空间分布角度分析,荒漠植被覆盖区降水量变化明显,且呈现增加趋势,森林覆盖区降雨量逐渐增大,而草场、农业植被覆盖的大部分地区降雨量下降的趋势略显。由于内蒙古自治区植被由西向东依次为荒漠植被、农业区、草原和稀疏灌丛、灌丛、草甸和森林[62],这一现象反映出内蒙古地区降水呈现两极变化的趋势,即西部的荒漠集中地区温度和降水全部增加,呈现出暖湿化的趋势,而与此相反,中东部地区则降水减少温度增加,呈现出了暖干化的趋势[63]。

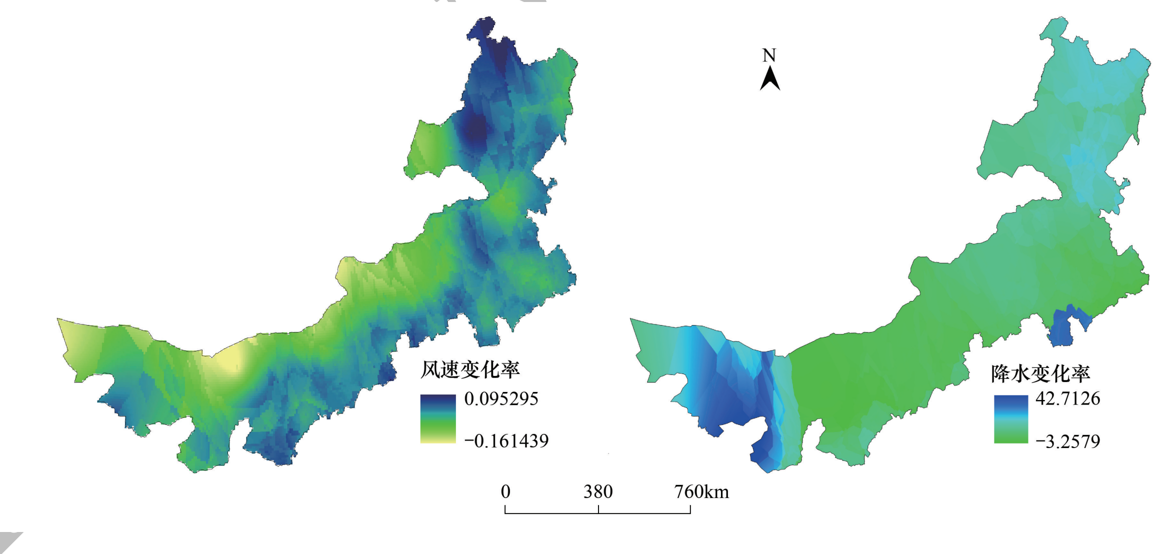


图 4　内蒙古自治区土壤保持服务压力空间格局

Fig.4　Spatial pattern of pressure on soil conservation service in Inner Mongolia Autonomous Region

内蒙古自治区的 NPP 变化率空间分布(图 5),总体上呈现出由西南向东北逐渐升高的分异格局。NPP 变化率高值区主要分布在呼伦贝尔市,表现出 NPP 增大的趋势;NPP 变化率低值区则主要分布在阿拉善盟,表现出 NPP 下降的趋势。内蒙古自治区的 NPP 空间分布受水热条件限制明显[64],并与 NPP 变化率的空间分布相似,亦呈现出东北高、西南低的格局。东北部地区是大兴安岭林区,植被覆盖率高,植被类型丰富,且分

布着额尔古纳河,水源充沛,生境良好,NPP 平均值超过了 437g C m^{-2} a^{-1};中部地区主要为草原草甸,伴随着降水的较少,NPP 值在 246g C m^{-2} a^{-1}左右;西部地区主要分布着巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和毛乌素沙地,荒漠区的植被覆盖率低,NPP 平均值在 100g C m^{-2} a^{-1}以下。

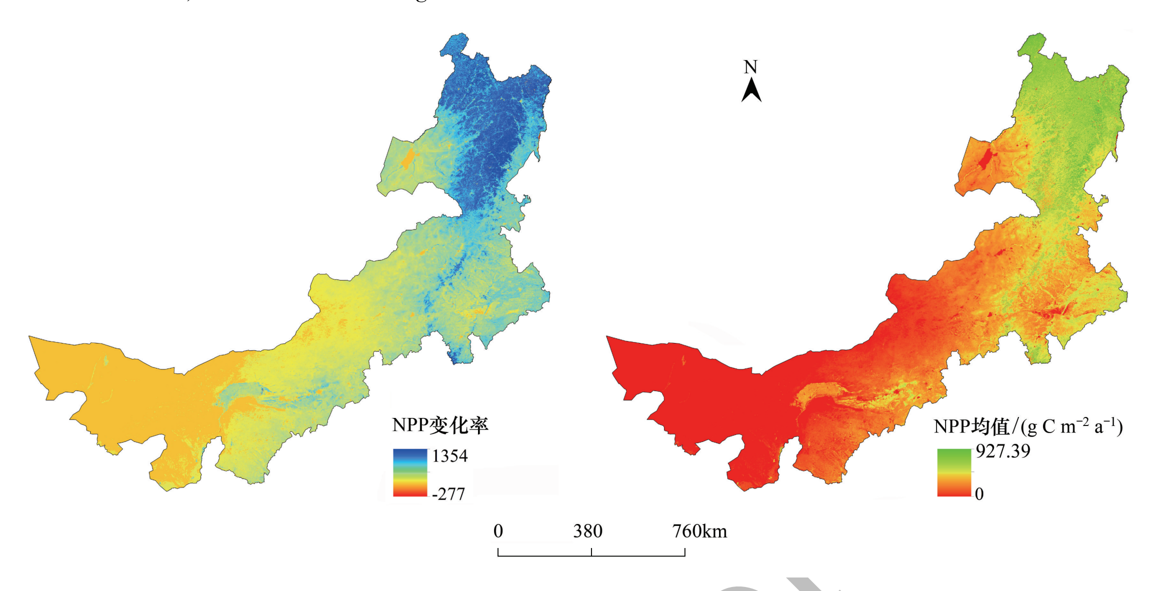


图 5　内蒙古自治区土壤保持服务响应空间格局

Fig.5　Spatial pattern of soil conservation service response in Inner Mongolia Autonomous Region

2.3　土壤保持服务分区

对比内蒙古自治区土壤保持服务 10 种分区方案的景观聚集度指数(图 6),为了更深入地反映内蒙古自治区不同功能区内部主要生态环境问题的差异性,在空间集聚度最小的 11 类分区方案的基础上,将其划分为 11 个土壤保持服务亚区。另一方面,当土壤保持服务区划分为 3 类时,分区单元的空间聚集度达到最高,分区结果最理想。因此,依据区域共轭性原理进行修正,将内蒙古自治区划分为 3 个土壤保持服务一级区及 11 个土壤保持服务二级区(图 7,表 2)。

表 2　内蒙古自治区土壤保持服务分区指标对比

Table 2　Zonal comparison of six indexes on soil conservation service in Inner Mongolia Autonomous Region

分区	压力 Pressure		状态 State		响应 Response	
	风速变化率	降水变化率	风蚀性土壤保持量	水蚀性土壤保持量	NPP 变化率	NPP 平均值
I-1	1.21	1.14	-1.60	0.24	1.88	1.63
I-2	1.17	0.89	-1.31	1.39	1.42	1.25
I-3	0.56	0.22	0.05	1.14	0.91	0.96
I-4	0.97	0.07	0.27	1.11	0.38	0.58
I-5	0.81	-0.49	1.68	0.04	-0.01	0.23
II-1	-0.24	-0.47	1.06	0.92	-0.16	0.02
II-2	-0.62	-0.52	0.61	-0.50	-0.41	-0.31
II-3	-0.16	-1.18	0.91	-0.98	-0.69	-0.60
III-1	-1.65	-1.47	-0.33	-1.27	-0.89	-0.89
III-2	-0.33	-0.30	-0.18	-0.48	-1.08	-1.23
III-3	-1.72	2.11	-1.17	-1.60	-1.36	-1.65

(1)土壤保持服务保护区(I):位于内蒙古自治区东部,主要包括呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市,占内蒙古自治区土地总面积的 41.3%。本区海拔 89—1753m,涵盖多种地貌类型,植被覆盖高;生境质量优良,有大面积的林地、耕地和草场,在土壤保持方面发挥着重要作用。保护区的降水与风速压力相对最大,但

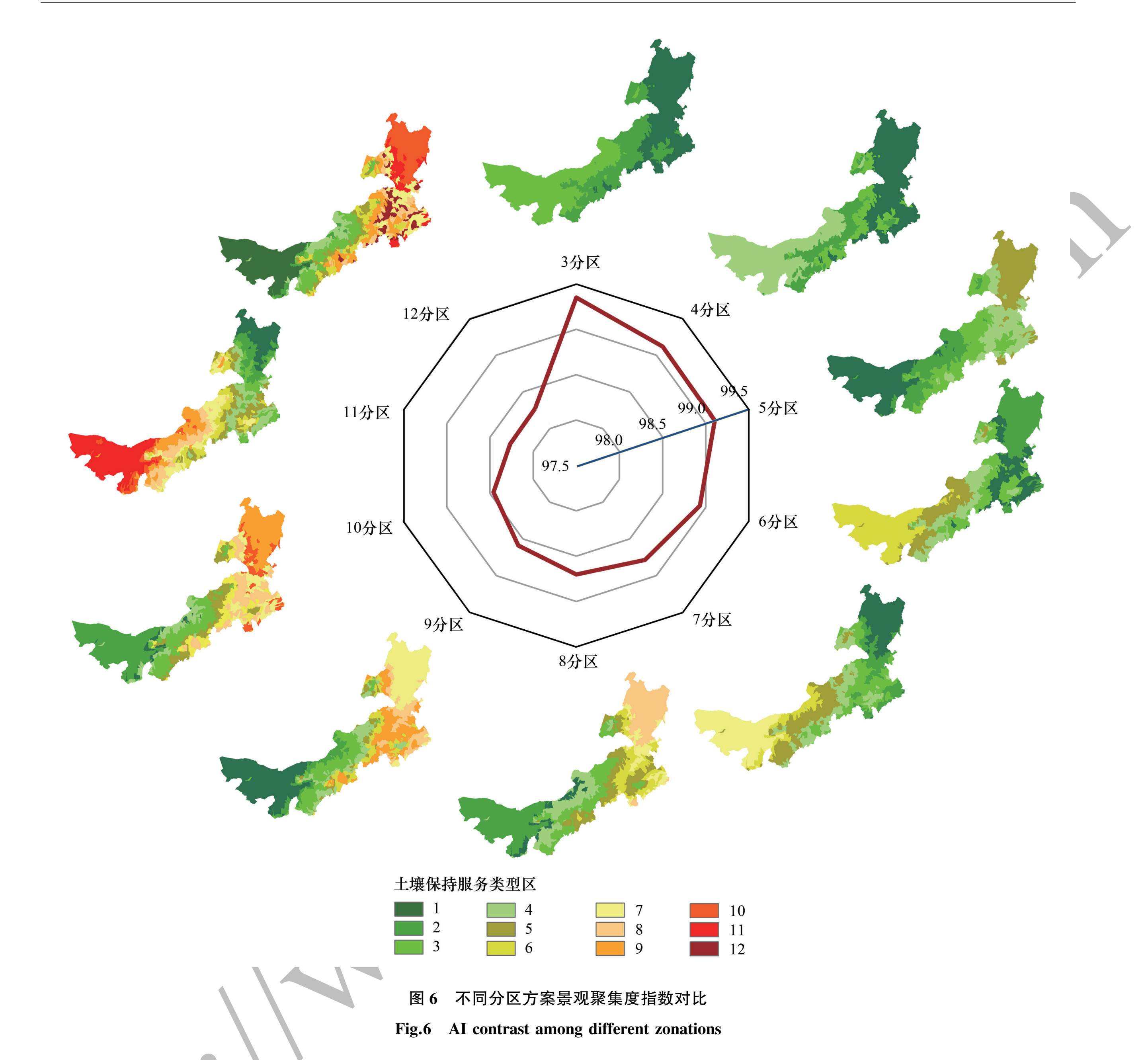


图 6　不同分区方案景观聚集度指数对比

Fig.6　AI contrast among different zonations

土壤保持服务能力最强,生态系统功能对环境气候条件的响应最显著。本区共包含 5 个土壤保持服务亚区,I-1 区主要位于呼伦贝尔东北部地区,植被生长状况良好,分布着莫道尔噶国家森林公园;风速波动性最大,但风蚀性土壤保持量最低、水土流失较为敏感,应通过划定天然林保护区、实施退耕还林、建设基本农田等措施加强水土流失治理。I-2 区分布在呼伦贝尔市内,位于大兴安岭北段两侧,该区域由于原始森林遭受多次采伐及农田开垦面积较大等因素,导致区域内有较为严重的水土流失问题;宜逐步发展林缘草地畜牧业,开展森林生态重建工作,调整产业结构,发展森林生态经济。I-3 区分布较为零散,主要集中在兴安盟与呼伦贝尔交界处、赤峰市南部和通辽与沈阳交界处;该区域生境质量较好,有阿尔山国家森林公园,但由于受到人为扰动较大,存在土壤侵蚀现象,应加大自然保护力度,禁止矿产资源开发活动。主要分布在兴安盟、通辽市和赤峰市的 I-4 区和 I-5 区是综合性土壤保持量最高的土壤保持服务亚区,I-4 区的水蚀性土壤保持量最高,I-5 区的风蚀性土壤保持量最高,两个区域的植被覆盖均较好。同时,I-4 区由于人为砍伐树木和放牧等扰动程度较大,森林资源受到多次破坏,破碎化现象较为严峻,应划定天然林、林缘草甸草原保护区,实施退耕还林还草以提升森林草原的土壤保持能力。而 I-5 区由于土地退化使得农田的土壤肥力有所下降,因此,应通过农田防护

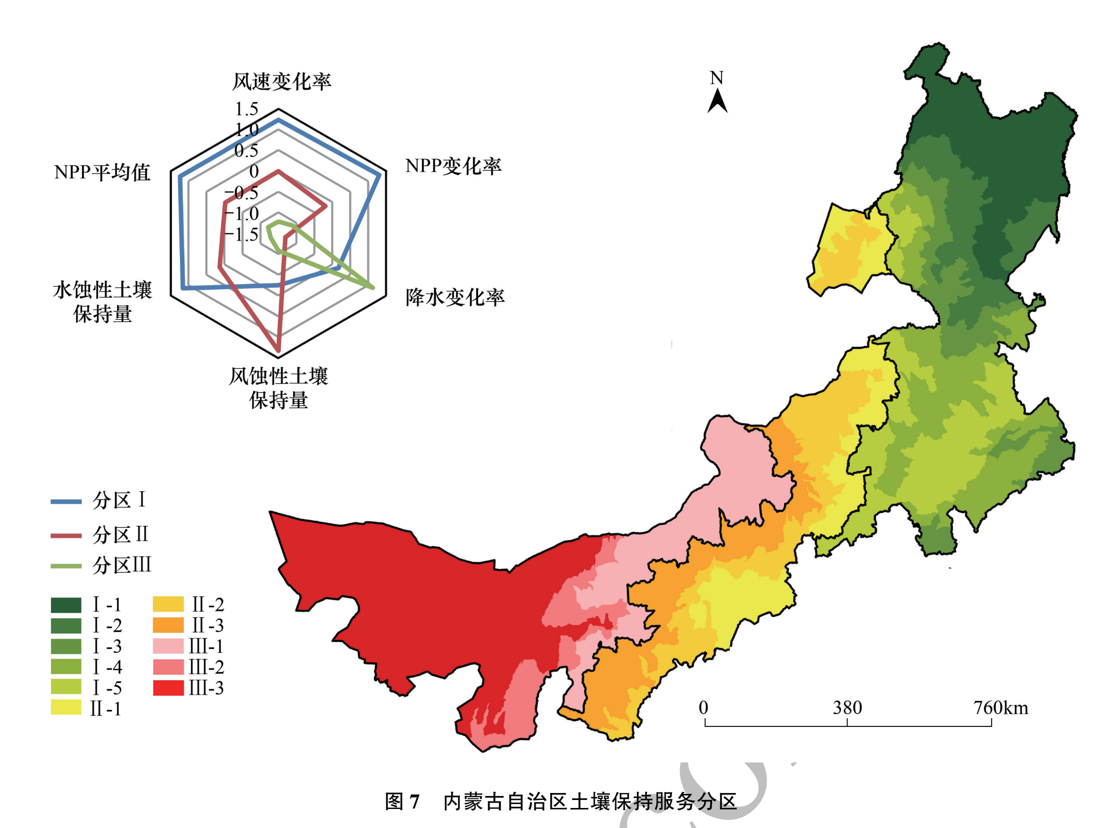


图7 内蒙古自治区土壤保持服务分区

Fig.7 Soil conservation service zonation in Inner Mongolia Autonomous Region

林的建设,加强基本农田保护,实施免耕、草田轮作等旱地保护性耕作法即降低土壤侵蚀、提升农田生产力。

(2)土壤保持服务控制区(Ⅱ):位于内蒙古自治区中部,主要包括锡林郭勒盟、乌兰察布南部,呼和浩特市和鄂尔多斯市,占内蒙古自治区土地总面积的25.2%。本区海拔825—2007m,地貌以高原为主,植被覆盖不高;生境质量一般,降水和风速常年较为稳定,防风固沙能力较强;城市化程度高,是内蒙古自治区的政治、经济和文化中心,人口相对较为密集。控制区的降水与风速压力相对最小,但土壤保持服务能力相对较强,生态系统功能对环境气候条件的响应较为显著。本区共包含了3个土壤保持服务亚区,II-1区主要分布在锡林郭勒东部边缘、呼伦贝尔西部以及呼和浩特市周边,存在的主要问题是超载放牧引起的草原退化、沙化、草场质量下降和耕地利用不合理,应设立草原生态功能保护区和封育保护区,实施强制性保护措施,退耕还草,坚决贯彻以牧为主的方针,恢复植被,发展农区畜牧业和养殖业。II-2区集中分布在呼伦贝尔高原中部和锡林郭勒-乌兰察布-鄂尔多斯条带,草地生产力普遍下降,部分地区退化严重,应强调土地资源的合理开发利用,不宜过度开垦和放牧。II-3区土壤风蚀沙化和砾石化现象较为明显,并存在水土流失问题。该区植被稀疏,超载放牧导致草场的退化严重,应采取人工种草、围封、轮牧、加强防护林网配置等措施,建立人工草地,增加舍饲比重来恢复草地植被,防止草原退化。

(3)土壤保持服务重建区(Ⅲ):位于内蒙古自治区西南部,主要包括锡林郭勒盟、乌兰察布市、包头市、巴彦淖尔和鄂尔多斯的部分地区和整个阿拉善盟,占内蒙古自治区土地总面积的33.5%。本区海拔942—3432m,地势起伏较大,植被覆盖稀疏;生境质量较差,沙漠化程度高,常年降水较少,分布腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠,生态环境脆弱。重建区的降水与风速压力相对较最大,但土壤保持服务能力最弱,生态系统功能对环境气候条件的响应最不显著。本区共包含3个土壤保持服务亚区,III-1区主要位于浑善达克沙地西北部,横跨锡林郭勒盟西北部、乌兰察布西北部、包头市北部、巴彦淖尔东北部和鄂尔多斯西部的少部分地区,风速和降水的波动性最大,并呈现出减小的趋势;作为我国北方重要的沙尘暴源头区,土地沙化、水土流失和植被退化现象严重;要以保护和恢复植被为重点,强化退牧还草,禁止开荒、滥樵采及过度放牧。III-2区位于巴彦淖尔、鄂尔多斯及阿拉善盟三地交界处,存在草场退化和土地沙化问题,由于自然和人为活动的原因造成沙丘

活化,生物多样性受到威胁;应重点保护天然植被,采取绝对保护措施控制沙化,在沙漠边缘地带设置锁边林带和沙障,通过封育和飞播等措施稳定沙漠,减少人为活动,遏制生态恶化。III-3 区主要位于阿拉善高原,分布着巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,降水量常年稀少,近年来出现增加的趋势;水蚀性土壤保持量最低,植被覆盖不高且逐渐退化,沙漠活化、生态环境退化问题突显;应以保护戈壁地表形态为重点,限制人类开发活动,控制沙化,保护沙漠周边地区的现存植被,维护生态环境现状。

将分区结果同内蒙古自治区多年平均等温线和等年降水量线叠置(图 8),比较分区结果和生态基底要素的一致性。对比年均温等值线的空间分布和分区结果,可以发现本分区方案对于热量要素的分区效果明显,11 类二级分区呈现出显著的热量梯度变化等级,符合内蒙古自治区由东向西的温度变化特征。对照年降水等值线的空间分布和分区结果,可以发现本分区方案划分的 3 类一级区呈现出由东北向西南的变化梯度,与内蒙古自治区的 400、200mm 等降水量线走向基本一致。总体而言,对照分区结果和内蒙古自治区的生态基底要素空间分布,3 类一级区及 11 类二级区的分区方案和研究区域的自然地理界线大致相符,这在一定程度上指示了自然地理要素对于生态系统服务空间分异的控制作用。

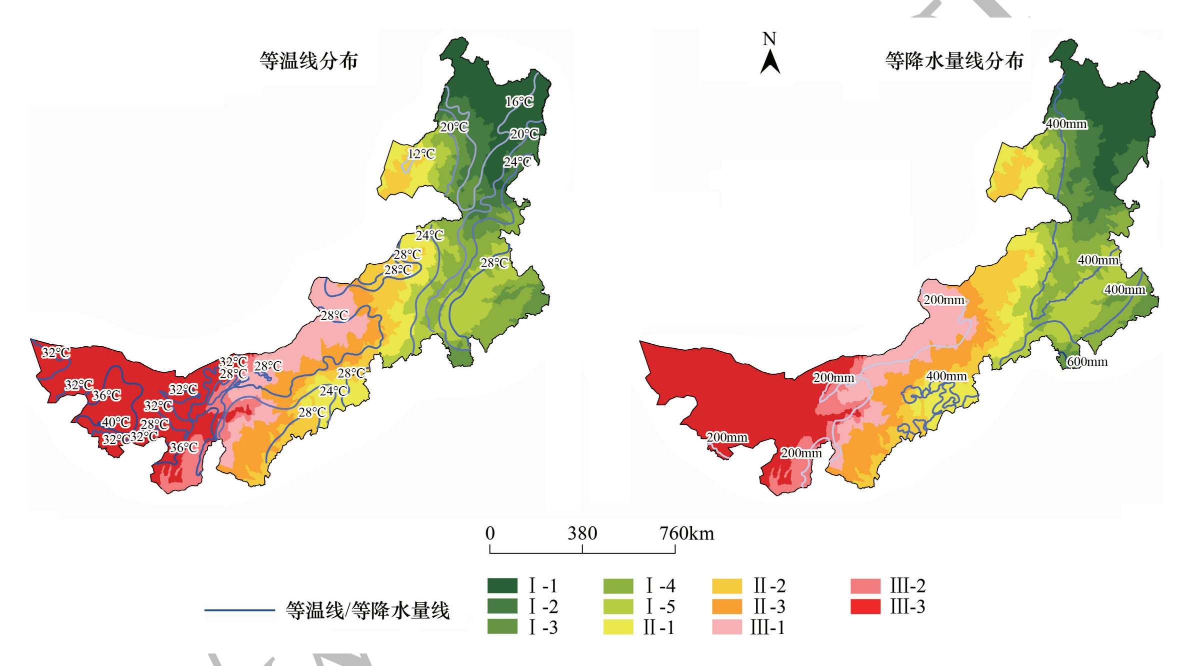


图 8　土壤保持服务分区方案同自然地理界线对比

Fig.8　Contrast of soil conservation service zoning and physical geography boundary

3　结语

土壤侵蚀是一种动态发展的土地退化过程。本研究重点关注内蒙古自治区土壤保持服务的空间分异,提出土壤保持服务的“压力-状态-响应”分区指标体系,输入 SOFM 网络对比分析多种分区方案,并基于景观聚集度指数优选分区方案。研究结果表明,内蒙古自治区可划分出土壤保持服务保护区、控制区和重建区 3 个一级区及 11 个二级区。根据分区特点能够揭示内蒙古地区气候背景、土壤保持能力和植被条件的地带性分异特点,更为清晰全面的刻画了流域尺度不同土壤保持服务区的空间分异特征。同时,将最优土壤保持服务分区结果与内蒙古自治区的年均温等值线和年降水量等值线进行对比,结果显示,通过 SOFM 神经网络得出的土壤保持服务分区结果与内蒙古生态基底要素具有良好的一致性,分区方案呈现明显梯度性且与气温、降水的变化走向一致。

然而,需要指出的是,本研究仍存在一些不足。首先,目前有关土壤侵蚀模型预测效果尚存争议,基于 RUSLE、RWEQ 模型计算出的土壤保持量是潜在侵蚀量和实际侵蚀量相减得到,其数值的绝对值具有较大不

确定性,也因此本研究重点关注这一指标的空间分异。如何更准确的度量内蒙古自治区的土壤侵蚀量、保持量,仍有待更多机理模型的探讨。其次,地理学和景观生态学的核心问题之一为尺度效应[65],空间统计单元的变化会对最终的分区结果产生影响,因此在今后的研究工作中可以进一步探讨空间统计单元变化对于分区结果的影响。再次,在干旱半干旱地区,风蚀与水蚀经常交替发生,二者之间可能存在叠加效应,对此如何定量表征将成为下一步工作的重点。此外,SOFM 神经网络模型虽能有效规避权重设置等主观问题,但在网络的构建及训练区的选择等方面仍有一定主观性,如何规避这些影响、改进 SOFM 模型,亦是有待深入探讨的重点问题。

参考文献(References):

[1] Luca M. Govern our soils. Nature, 2015, 528(7580): 32-33.
[2] 程冬兵, 蔡崇法, 左长清. 土壤侵蚀退化研究. 水土保持研究, 2006, 13(5): 252-254.
[3] 赖仕嶂, 吴锡玄, 杨玉盛, 陈光水, 谢锦升. 论森林与土壤保持. 福建水土保持, 2001, 13(2): 11-14.
[4] 杨卿, 郎南军, 苏志豪, 蔡烁. 土壤退化研究综述. 林业调查规划, 2009, 34(1): 20-24.
[5] 谢花林, 李秀彬. 基于 GIS 的农村住区生态重要性空间评价及其分区管制——以兴国县长冈乡为例. 生态学报, 2011, 31(1): 230-238.
[6] Bailey R G. Ecoregions of the United States. Utah, Ogden: U. S. Forest Service, 1976.
[7] Omernik J M. Map supplement: ecoregions of the conterminous united states. Annals of the Association of American Geographers, 1987, 77(1): 118-125.
[8] Elder J. The big picture: sierra club critical ecoregions program. Sierra, 1994, 79(2): 52-57.
[9] Olsen D M, Dinerstein E. The global 200: a representation approach to conserving the earth's most biologically valuable ecoregions. Conservation Biology, 1998, 12(3): 502-515.
[10] 王传辉, 吴立, 王心源, 王官勇, 孙叶根, 胡降临. 基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究. 生态学报, 2013, 33(18): 5808-5817.
[11] 傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 中国生态区划的目的、任务及特点. 生态学报, 1999, 19(5): 591-595.
[12] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.
[13] 杨勤业, 李双成. 中国生态地域划分的若干问题. 生态学报, 1999, 19(5): 596-601.
[14] 王治江, 李培军, 王延松, 胡涛, 巩宗强, 孙铁珩, 王忠成, 陈大光. 辽宁省生态功能分区研究. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1339-1342.
[15] 曹小娟, 曾光明, 张硕辅, 周建飞, 朱华, 石林. 基于 RS 和 GIS 的长沙市生态功能分区. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1269-1273.
[16] 罗怀良, 朱波, 刘德绍, 贺秀斌. 重庆市生态功能区的划分. 生态学报, 2006, 26(9): 3144-3151.
[17] 鲁春霞, 李亦秋, 闵庆文, 张彪, 李娜, 孙艳芝, 张静. 首都生态圈生态功能分区与评价. 资源科学, 2015, 37(8): 1520-1528.
[18] 李卫国, 赵彦伟, 盛连喜. 长春市生态功能区划及其调控对策研究. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(1): 160-165.
[19] 祁豫玮, 顾朝林. 市域开发空间区划方法与应用——以南京市为例. 地理研究, 2010, 29(11): 2035-2044.
[20] 米文宝, 杨茂胜, 余晓霞. 市域主体功能区划的理论与方法——以宁夏银川市为例. 经济地理, 2009, 29(8): 1233-1238.
[21] 李潇然, 李阳兵, 王永艳, 邵景安. 三峡库区县域景观生态安全格局识别与功能分区——以奉节县为例. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1959-1967.
[22] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 李士美, 范娜, 张彩霞, 裴厦, 盖力强. 澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征. 资源科学, 2013, 35(4): 1240-1247.
[23] 高俊刚, 吴雪, 张镱锂, 刘林山, 王兆锋, 姚治君. 基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区. 生态学报, 2016, 36(1): 134-147.
[24] 史娜娜, 战金艳, 吴锋, 林英志. 生态系统服务功能动态区划系统及其在鄱阳湖湖区的应用. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1909-1914.
[25] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 赵志强. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. 地理学报, 2011, 66(12): 1618-1630.
[26] 丛威青, 潘懋, 李铁锋. 不确定性推理及其在斜坡类地质灾害危险性区划中的应用. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(2): 198-203.
[27] 黄姣, 高阳, 赵志强, 李双成. 基于 GIS 与 SOFM 网络的中国综合自然区划. 地理研究, 2011, 30(9): 1648-1659.
[28] 刘娅, 朱文博, 韩雅, 李双成. 基于 SOFM 神经网络的京津冀地区水源涵养功能分区. 环境科学研究, 2015, 28(3): 369-376.
[29] 李双成, 郑度, 张镱锂. 青藏高原生态资产地域划分中的 SOFM 网络技术. 自然资源学报, 2002, 17(6): 750-756.
[30] 韩忆楠, 彭建, 王仰麟. 基于自组织特征映射(SOFM)网络的农牧交错带景观分区——以内蒙古自治区为例. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1224-1230.
[31] 张学儒, 张镱锂, 刘林山, 张继平. 基于 SOFM 神经网络模型的土地类型分区尝试——以青藏高原东部样带为例. 地理研究, 2013, 32(5): 839-847.

[32] Peng J, Ma J, Yuan Y, Wei H. Integrated urban land-use zoning and associated spatial development: case study in Shenzhen, China. Journal of Urban Planning and Development, 2015, 141(4): 05014025.

[33] 郝成元, 吴绍洪, 李双成. 基于 SOFM 的区域界线划分方法. 地理科学进展, 2008, 27(5): 121-127.

[34] 张甜, 彭建, 刘焱序, 赵明月. 基于植被动态的黄土高原生态地理分区. 地理研究, 2015, 34(9): 1643-1661.

[35] 彭建, 胡熠娜, 吕慧玲, 郦天昳, 陈昕. 基于要素-结构-功能的生态功能分区——以大理白族自治州为例. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2251-2259.

[36] 杨勤科, 李锐. 中国水土流失和水土保持定量研究进展. 水土保持通报, 1998, 18(5): 13-18.

[37] 刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用. 水土保持通报, 2001, 21(1): 57-59, 62-62.

[38] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20.

[39] 田光进, 张增祥. 中国耕地土壤侵蚀空间分布特征及生态背景. 生态学报, 2002, 22(1): 10-16.

[40] 王治国, 王春红. 对我国水土保持区划与规划中若干问题的认识. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 105-109.

[41] 巩国丽, 刘纪远, 邵全琴. 基于 RWEQ 的 20 世纪 90 年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究. 地理科学进展, 2014, 33(6): 825-834.

[42] 郭中领. RWEQ 模型参数修订及其在中国北方应用研究. 北京: 北京师范大学, 2012.

[43] 陈龙, 谢高地, 裴厦, 张昌顺, 范娜, 张彩霞, 李士美. 澜沧江流域生态系统土壤保持功能及其空间分布. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2249-2256.

[44] 孙根年, 王美红. 内蒙古植被覆盖与土地退化关系及空间结构研究. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 140-144.

[45] 慈龙骏. 中国的荒漠化及其防治. 北京: 高等教育出版社, 2005.

[46] Lal R. Soil erosion by wind and water: problems and prospects//Lal R, ed. Soil Erosion Research Methods. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society of America, 1988: 1-6.

[47] Callot Y, Marticorena B, Bergametti G. Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: application to the Sahara Desert. Geodinamica Acta, 2000, 13(5): 245-270.

[48] Lal R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. Critical Reviews in Plant Sciences, 1998, 17(4): 319-464.

[49] Pimentel D, Kounang N. Ecology of soil erosion in ecosystems. Ecosystems, 1998, 1(5): 416-426.

[50] 王娟, 李宝林, 余万里. 近 30 年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 132-138.

[51] 于国茂, 刘越, 艳燕, 胡云峰. 2000-2008 年内蒙古中部地区土壤风蚀危险度评价. 地理科学, 2011, 31(12): 1493-1499.

[52] 王静爱, 左伟. 中国地理图集. 北京: 中国地图出版社, 2009.

[53] 刘全友, 童依平. 北方农牧交错带土地利用现状对生态环境变化的影响——以内蒙古多伦县为例. 生态学报, 2003, 23(5): 1025-1030.

[54] 胡云锋, 刘纪远, 齐永青, 师华定. 内蒙古农牧交错带生态工程成效实证调查和分析. 地理研究, 2010, 29(8): 1452-1460.

[55] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, Schomberg H, Stout J E, Zobeck T M. RWEQ: improved wind erosion technology. Journal of Soil & Water Conservation, 2000, 55(2): 183-189.

[56] 吴发启, 张玉斌, 王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 34-37.

[57] 江凌, 肖燚, 欧阳志云, 徐卫华, 郑华. 基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算. 水土保持研究, 2015, 22(1): 21-25, 32-32.

[58] 彭建, 李丹丹, 张玉清. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇西北山区土壤侵蚀空间特征分析——以云南省丽江县为例. 山地学报, 2007, 25(5): 548-556.

[59] Kohonen T. Self-Organizing Maps. New York: Springer-Vedag, 1997.

[60] 贾良清, 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 肖燚, 肖荣波, 郑华. 安徽省生态功能区划研究. 生态学报, 2007, 25(2): 254-260.

[61] 甄霖, 谢高地, 杨丽, 成升魁. 泾河流域分县景观格局特征及相关性. 生态学报, 2005, 25(12): 3343-3353.

[62] 时忠杰, 高吉喜, 徐丽宏, 冯朝阳, 吕世海, 尚建勋. 内蒙古地区近 25 年植被对气温和降水变化的影响. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1594-1601.

[63] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 虞俊. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236.

[64] 郭灵辉, 郝成元, 吴绍洪, 高江波, 赵东升. 21 世纪上半叶内蒙古草地植被净初级生产力变化趋势. 应用生态学报, 2016, 27(3): 803-814.

[65] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. 生态学报, 2001, 21(12): 2096-2105.